

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.002.

张斌, 夏秋月. 武汉城市圈碳储量的地形梯度效应及脆弱性[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 443-452.

ZHANG Bin, XIA Qiuyue. Topographic Gradient Effect and Vulnerability Analysis of Carbon Storage in Wuhan Urban Circle[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 443-452.

# 武汉城市圈碳储量的地形梯度效应及脆弱性

张斌<sup>1</sup>, 夏秋月<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学 公共管理学院, 武汉 430074; 2. 华中农业大学 公共管理学院, 武汉 430070)

**摘要:** [目的] 准确评估区域碳储量的时空分异, 分析其地形梯度效应及对土地利用的脆弱性, 对区域“双碳”目标的实行具有重要意义。[方法] 以武汉城市圈为例, 采用 InVEST 模型借助 GIS 平台评估区域碳储量的时空分异特征, 并基于 DEM 数据运用地形位指数探讨碳储量的地形梯度效应, 再利用潜在影响指数揭示碳储量的脆弱性。[结果] (1) 武汉城市圈 2005—2020 年总碳储量先减少后增加, 在空间分布上呈现中西低、南北高态势, 城市间内部差异较大。(2) 武汉城市圈的地形位整体上表现为中西部低、南北部高态势, 1 级占比最大。由空间自相关分析可知, 区域地形位与碳密度呈现显著空间正相关关系。(3) 耕地转向建设用地是造成区域碳储量流失的主要原因, 导致碳流失高达 7.068 Tg, 而耕地向林地的转化是区域碳储量增加的主要原因, 扩充区域碳库 7.62 Tg。就碳储量的脆弱性评估而言, 从城市圈整体上来看, 2005—2020 年的 PI 指数均为负, 表明区域土地利用会对碳储量造成负面的潜在影响。[结论] 武汉城市圈碳储量总体上有所减少且内部城市差异较大, 地形位与碳密度呈显著正相关, 土地利用变化导致碳储量的脆弱性较高。

**关键词:** 武汉城市圈; 碳储量; 地形梯度; 土地利用变化; 脆弱性

**中图分类号:** X171.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2023)05-0443-10

## Topographic Gradient Effect and Vulnerability Analysis of Carbon Storage in Wuhan Urban Circle

ZHANG Bin<sup>1</sup>, XIA Qiuyue<sup>2</sup>

(1. School of Public Administration, Huazhong University of Science and Technology,

Wuhan 430074, China; 2. School of Public Administration, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** [Objective] Accurately assessing the spatial and temporal differentiation of regional carbon storage, and analyzing its topographic gradient effect and vulnerability to land use, are of great significance for the implementation of the regional ‘two carbon’ goal. [Methods] Wuhan urban circle was taken as an example. The InVEST model was used to evaluate the spatial and temporal differentiation characteristics of regional carbon storage with the help of GIS platform, and based on DEM data, the terrain index was used to explore the topographic gradient effect of carbon storage, and the potential impact index was used to reveal the vulnerability of carbon storage. [Results] (1) From 2005 to 2020, the total carbon storage in Wuhan urban circle first decreased and then increased, showing a trend of low in the middle and west and high in the north and south in terms of spatial distribution, with large differences between cities. (2) The topographic position of Wuhan urban circle is generally low in the central and western regions and high in the north and south, with the largest proportion of level 1. From the spatial autocorrelation analysis, it can be seen that there is a significant positive spatial correlation between regional topographical position and carbon density. (3) The

收稿日期: 2022-07-11

修回日期: 2022-08-06

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“土地发展空间异质性与跨区域碳排放权交易及补偿机制研究: 以武汉城市圈为例”(71774064)

第一作者: 张斌(1997—), 男, 湖北武汉人, 博士研究生, 主要研究方向为土地资源与经济。E-mail: 1480992336@qq.com

夏秋月(1993—), 女, 河南新乡人, 博士研究生, 主要研究方向为区域经济与低碳土地利用。E-mail: xiaqiuyue231231@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

conversion of cultivated land to construction land is the main reason for the loss of regional carbon storage, resulting in a carbon loss of up to 7.068 Tg, while the conversion of cultivated land to forest land is the main reason for the increase of regional carbon storage, expanding the regional carbon pool by 7.62 Tg. As far as the vulnerability assessment of carbon storage was concerned, from the perspective of the urban circle as a whole, the PI indices from 2005 to 2020 were all negative, indicating that regional land use could have a negative potential impact on carbon storage. [Conclusion] The carbon storage in Wuhan urban circle has generally decreased and there are significant differences among internal cities. The topographic position is significantly positively correlated with carbon density, and the vulnerability of carbon storage is high due to land use change.

**Keywords:** Wuhan urban circle; carbon storage; terrain gradient; land use change; vulnerability

全球气候变暖是全人类面临的最大挑战之一<sup>[1]</sup>。IPCC 第五次评估报告指出,自 1880—2012 年以来,全球地表平均气温已上升 0.65~1.06℃,而人类活动造成的 CO<sub>2</sub> 排放是最重要的因素之一。气候变暖对人类社会发展和资源环境造成了严重的负面影响<sup>[2]</sup>。从屡创新高的极端气温,到澳大利亚绵延的森林大火,人类正遭受着全球变暖带来的灾害。相关研究指出,如若气候变暖以现有趋势继续发展,极端天气和气候灾难将更加频繁,致命传染病也会全球蔓延<sup>[3]</sup>。因此,如何减缓气候变暖,减少 CO<sub>2</sub> 排放、提升固碳能力,走可持续发展之路,成为各国学者研究的难点<sup>[4]</sup>。作为负责任的大国,中国政府在第七十五届联合国大会一般性辩论上庄严承诺“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和”<sup>[5]</sup>。联合国的千年生态系统评估报告指出,陆地生态系统因地表分布的大量固碳单元在吸收 CO<sub>2</sub>,调节气候变化方面起着关键作用<sup>[6]</sup>。提高陆地生态系统碳储量能有效减少 CO<sub>2</sub> 含量,是减缓温室效应最经济可行且对环境友好的途径之一<sup>[7]</sup>。

梳理国内外相关研究可发现,学者们大致从碳储量的估算方法、影响因素和模拟预测这 3 个方面来开展的。碳储量估算方法主要包括样地清查、模型分析以及遥感估算法<sup>[8]</sup>。在科技尚未成熟时,样地清查法采用较多,如通过土壤剖面取样分析等研究土壤和植被碳密度,但由于采样周期长和工作繁琐等缺点,不适用于大尺度范围的研究<sup>[9]</sup>。随着科技的进步,模型分析及遥感技术的方法逐渐成为估算碳储量的主流<sup>[10-11]</sup>。随着国内外学者对碳储量的研究愈发深入,影响碳储量的因素也逐渐明晰。土地利用变化是引起碳储量改变的主要因素,已成为学者们的普遍共识<sup>[12-13]</sup>。碳储量的预测即是在此基础上,模拟多情景土地利用变化下的碳储量演变特征<sup>[14]</sup>。但目前的研究大多集中于流域<sup>[15]</sup>、湿地<sup>[16]</sup>、海岸带等<sup>[17]</sup>重要生态保护区或生态脆弱区,有关城市群的相对较少,而

城市群既是国家经济发展的重要推动力,又是新型城镇化的核心区,需格外注重对生态系统的保护。

地形因子作为地表能量转换与物质迁移的重要驱动力,对碳储量的时空分异有着重要影响<sup>[18]</sup>,但鲜有学者关注碳储量的地形梯度效应。李妙宇等以黄土高原地区为例,基于路径分析方法发现海拔是影响区域碳储量空间格局的主要因素之一<sup>[19]</sup>;徐彩仙等研究甘肃白龙江流域碳储量服务的地形梯度特征,发现区域碳储量随着坡度的增加而增加<sup>[20]</sup>。这些研究在一定程度上揭示了碳储量与区域地形之间的相关性,但并未深入研究两者的空间关联关系。此外,IPCC, GLP 和 UNEP 等组织基于全球气候变化视角开展了一系列土地—生态耦合系统的脆弱性研究<sup>[21-23]</sup>。而国内学者专注于土地利用变化下的农户的脆弱性,较少涉及生态系统服务的脆弱性分析<sup>[24]</sup>。牛志君等基于巨鹿县 2000—2015 年土地利用数据和碳密度数据,发现研究期内区域碳储量随着土地利用强度的增加而增加<sup>[25]</sup>;向书江等采用潜在影响指数评估重庆主城区 20 年间的碳储量脆弱性,发现土地利用强度对碳储量均表现为负面潜在影响<sup>[26]</sup>。这些研究为碳储量服务的脆弱性评估打下了坚实的基础,但未对多尺度下的碳储量脆弱性开展评价。

武汉城市圈作为长江中游城市群的核心之一,2021 年经济总量跨越 3 万亿元,为全国省域城市圈第一,经济发展势头强劲,资源环境约束愈发凸显,或对碳储量的维持产生负向影响。同时该区域兼有平原丘陵山地湖泊,较宜进行地形梯度研究。鉴于此,本文选择武汉城市圈为研究对象,基于 2005—2020 年四期土地利用数据,采用 InVEST 模型借助 GIS 平台评估区域碳储量的时空分异特征,并基于 DEM 数据运用地形位指数探讨碳储量的地形梯度效应,再利用潜在影响指数揭示多尺度下的碳储量脆弱性,以期为区域国土空间规划和生态系统的可持续发展提供一定借鉴。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

武汉城市圈地处 112°30′—116°07′E, 29°05′—31°51′N, 中国中部, 长江中游、湖北省东部, 以武汉为中心, 黄石为副中心, 涵盖鄂州、黄冈、孝感、咸宁、仙桃、潜江和天门等 9 个城市(图 1)。属典型的亚热带季风性湿润气候, 冬冷夏热四季分明, 降雨充沛光照充足, 水热条件匹配较好。地势大致呈现三面环山, 向西开口的特征, 北依桐柏山和大别山, 南接幕阜山脉, 中部和西部为江汉平原以及低山丘陵, 水网密布湖泊众多。交通区位优势, 武汉市素有“九省通衢”的美誉, 是我国内陆最大的水陆空综合交通枢纽。城市圈内部正积极构建“1+8”的 1 h 交通联系网络, 极大地促进了城市间的互融互通。2015 年国务院正式批复《长江中游城市群发展规划》, 武汉城市圈作为核心之一, 逐渐成为中部崛起的重要战略支点和长江中游城市群的重要增长极。2021 年经济总量跨越 3 万亿, 为全国省域城市圈第一。然而经济的腾飞伴随着城镇无序扩张、资源过度利用等问题, 区域碳储量流失严重, 已成为城市圈走高质量发展之路的重大挑战。

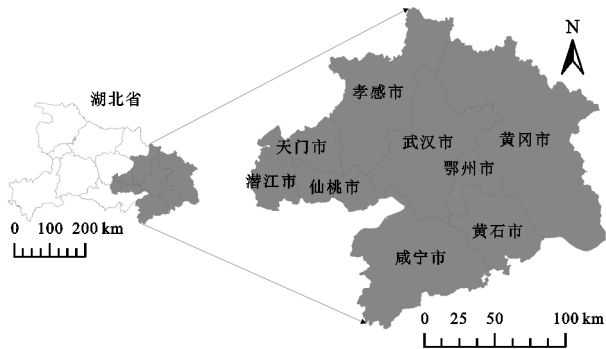


图 1 武汉城市圈地理区位

1.2 数据来源

本文数据主要有:(1) 土地利用数据:来源于 land-sat-8 遥感数据, 一共 4 期, 年份为 2005—2020 年, 划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地共 6 类。(2) DEM 数据:来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。(3) 基础地理数据:来源于国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn/>)。(5) 社会经济数据:来源于武汉城市圈各市历年统计年鉴。

2 研究方法

2.1 InVEST 模型

InVEST 模型中的 Carbon 模块假设各地类对应一个由地下碳密度、地上碳密度、死亡有机质碳密度和土壤有机质碳密度构成的总碳密度, 且某一种地类

的碳密度是一种常量<sup>[27]</sup>。公式为:

$$C_i = C_{i-above} + C_{i-below} + C_{i-dead} + C_{i-soil}$$
 (1)

$$C_{i-total} = C_i \times A_i$$
 (2)

式中: $C_i$ 为地类  $i$  的总碳密度; $C_{i-above}$ 为地类  $i$  的地上碳密度; $C_{i-below}$ 为地类  $i$  的地下碳密度; $C_{i-dead}$ 为地类  $i$  的死亡有机质碳密度; $C_{i-soil}$ 为地类  $i$  的土壤有机质碳密度; $C_{i-total}$ 为地类  $i$  的总碳储量; $A_i$ 为地类  $i$  的面积。各地类碳密度(表 1)的确定详见参考文献<sup>[28]</sup>。

表 1 各地类碳密度 t/hm<sup>2</sup>

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	死亡有机质碳密度	土壤有机质碳密度
耕地	4.02	0.75	2.11	98.13
林地	22.62	18.03	2.78	126.75
草地	3.6	11.7	7.28	90.43
水域	1.59	0	3.98	64.03
建设用地	0.83	0.08	0	43.71
未利用地	0.59	0.64	0.96	28.42

2.2 地形位指数

地形因子往往通过高程和坡度的相互作用来约束地类的分布<sup>[29]</sup>。本文为反映这种综合影响, 本文采用地形位指数度量区域地形梯度, 公式为:

$$T = \lg \left[ \left( \frac{E}{\bar{E}} + 1 \right) \times \left( \frac{S}{\bar{S}} + 1 \right) \right]$$
 (3)

式中: $T$ 为地形位指数; $E$ 和 $\bar{E}$ 分别为区域某一点和平均高程值; $S$ 和 $\bar{S}$ 分别为区域某一点和平均坡度值。

2.3 空间自相关分析

为了探究地形位指数与碳储量服务之间的空间格局, 本文基于 ArcGIS 软件和 Geoda 软件进行空间自相关分析。空间自相关由全局和局部自相关构成。全局自相关可分析研究区内单元间某一特征的整体相关水平, 而局部自相关用于计算局部临近单元间某一特征的相关水平, 能更准确地把握局部聚集和分异水平。双变量空间自相关在二者的基础上进一步扩展, 可对两种要素之间的空间相关关系进行度量。其中, “高高聚类”和“低低聚类”为协同关系, “高低聚类”和“低高聚类”为权衡关系<sup>[30-31]</sup>。计算公式为:

$$I_{lm}^{pq} = Z_l^p \times \sum_{q=1}^n W_{pq} \times Z_m^q$$
 (4)

式中: $I_{lm}^{pq}$ 为莫兰指数; $Z_l^p = (X_l^p - \bar{X}_l) / e_l$ ;  $Z_m^q = (X_m^q - \bar{X}_m) / e_m$ ;  $X_l^p$ 为空间像元  $p$  的特定属性  $l$  的数值;  $X_m^q$ 是空间像元  $q$  的特定属性  $m$  的数值;  $\bar{X}_l$ 和 $\bar{X}_m$ 分别对应属性  $l$  与属性  $m$  的平均值;  $e_l$ 和 $e_m$ 分别对应属性  $l$  与属性  $m$  的方差;  $W_{pq}$ 为空间权重矩阵。

2.4 土地利用强度综合指数

人类对不同土地资源的投入和利用程度有所差异,

最直接的表现就是土地利用强度的区别。研究显示,土地利用强度与生态系统有着密切联系,是促进生态系统服务变化的重要原因。本文参考相关研究<sup>[32]</sup>,将不同地类进行土地利用强度划分(表 2),公式为:

$$L = 100 \times \left( \sum_{i=1}^n P_i \times Q_i \right) \quad (5)$$

式中: $L$  为土地利用强度综合指数; $P_i$  为第  $i$  级土地利用强度; $Q_i$  为第  $i$  级地类面积占比。

表 2 土地利用强度划分

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
强度等级	3.00	2.00	2.00	2.00	4.00	1.00

## 2.5 脆弱性评估

IPCC 报告首次提出脆弱性为度量某个系统无法处理气候变化负面影响的程度。随后 Schröter 将土地利用变化纳入该系统,拓展了脆弱性的内涵<sup>[33]</sup>。脆弱性是指区域生态系统服务在外界干扰时缺乏适应力,导致其功能逐步退化的一种属性。而碳储存服务为生态系统服务的重要组成部分,因此为缓解区域碳储量的过快流失,综合开展区域土地利用变化下的碳储量脆弱性分析十分必要。本文基于此,并结合 Metzger 提出的脆弱性的量化方法,采用潜在影响指数(PI)来度量碳储量服务于土地利用变化中的脆弱

性<sup>[34]</sup>。其作用机制如图 2 所示,脆弱性的量化是关于土地系统暴露与生态系统敏感的函数,两个系统是相互影响的;土地系统暴露即为区域土地利用发生变化打破了两个系统间原有的平衡,而这种变化是身处于生态系统之中的,而生态系统敏感则是生态系统感知土地利用变化并据此调整供给能力的过程。本文对生态系统服务之一——碳储量服务进行评估,致力于找出人类发展过程中的不协调因素,弄清脆弱性的潜在驱动力并逐步提高人类社会对自然的适应能力。在土地系统中,因土地利用需求的差异,加之自然和社会经济的驱动,不同时期土地利用变化模式存在多样性。而土地利用变化模式的差异会引起地类转变、地类渐变和管理方式的不同,最终导致土地利用强度变化差异。在生态系统中,区域不同时期土地利用变化的碳储量亦有区别,其与基准年份的增减势态将会导致区域生态系统服务出现分层,而这种分层表现为土地系统对生态系统潜在影响指数的差异。具体计算公式为:

$$PI = \frac{\Delta C}{\Delta L} \quad (6)$$

式中: $\Delta L$  为土地利用强度变化量; $\Delta C$  为碳储量变化量。

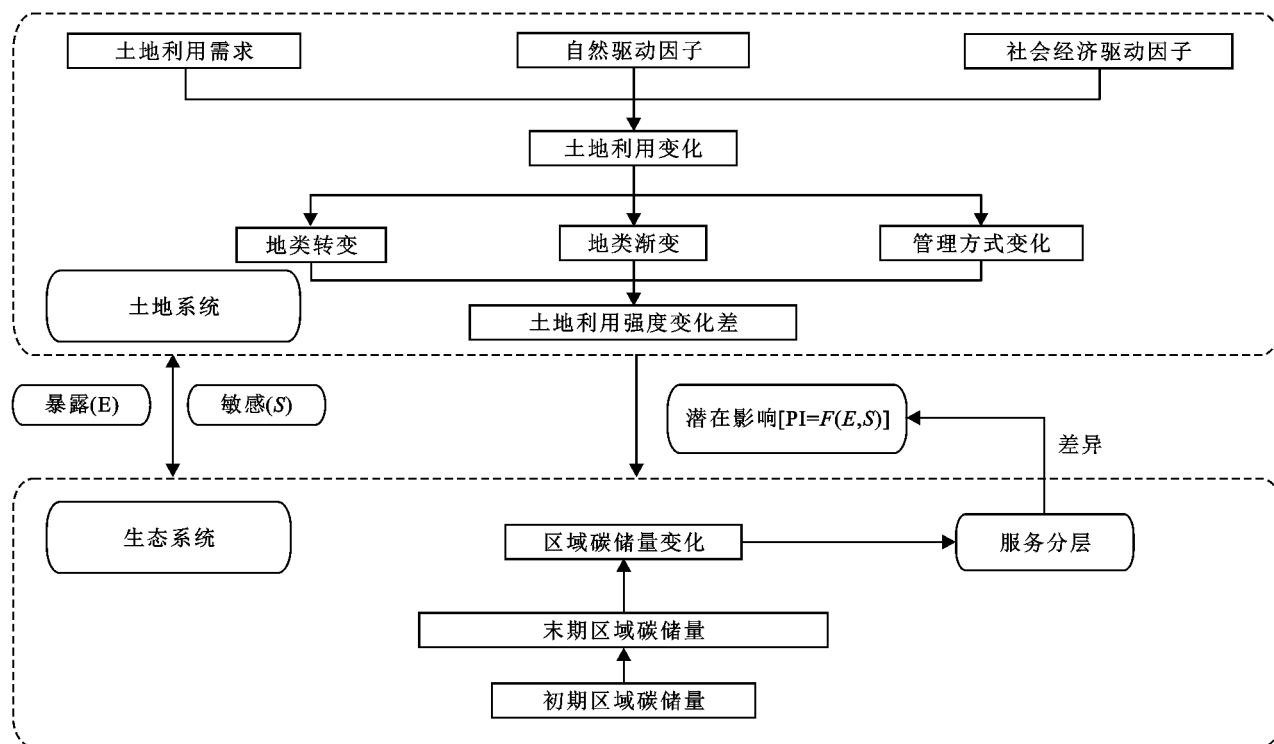


图 2 脆弱性机理

## 3 结果与分析

### 3.1 碳储量的时空变化特征

基于各地类的总碳密度,并结合 GIS 平台中武

汉城市圈 2005—2020 年的土地利用栅格图,本文运用 InVEST 模型可得到城市圈各时期的碳储量情形。由图 3 可知,从整体来看,2005 年、2010 年、2015 年、2020 年武汉城市圈碳储量分别为 679.989 Tg,678.747 Tg,



673.832 Tg 和 678.063 Tg,地均碳密度分别为 117.491 t/hm<sup>2</sup>,117.277 t/hm<sup>2</sup>,116.428 t/hm<sup>2</sup>,117.159 t/hm<sup>2</sup>,15 a 间武汉城市圈总碳储量呈先减少后增加势态。从不同时期来看,2005—2010 年碳储量仅仅减少了 1.242 Tg,减少率为 0.18%,而 2010—2015 年期间碳储量减少最多,净减少量为 4.915 Tg,分析其原因可能是 2010 年以来武汉城市圈经济保持高速增长的同时,对生态用地和耕地的侵占相当严重。而 2015—2020 年碳储量增加了 4.231 Tg,说明该时间段内有效兼顾了经济发展与环境保护之间的平衡。

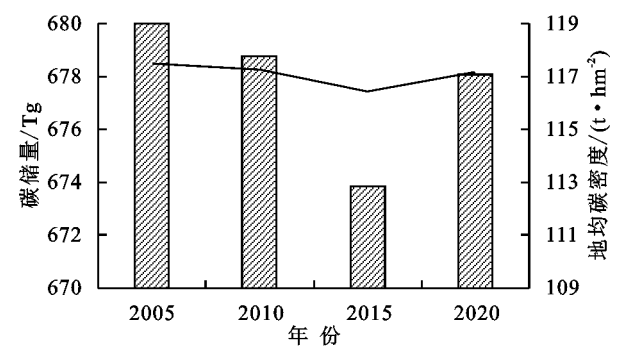


图 3 2005—2020 年碳储量和地均碳密度变化情况

各城市碳储量和地均碳密度的变化情况与城市圈整体趋势大致相同,但城市间内部差异较大(表 3)。其中,黄冈、咸宁和孝感是城市圈中碳储量最多的 3 个城市,2020 年三者碳储量之和约占区域的 67.84%,是区域的重要碳库,也是 2015—2020 年仅有的碳储量增加的三

座城市。而鄂州、潜江和仙桃城市圈中碳储量最少的 3 个城市,2020 年三者碳储量之和仅占区域的 8.27%。就地均碳密度而言,2020 年地均碳密度最高的城市为咸宁(139.487 t/hm<sup>2</sup>),最低的城市为仙桃(90.222 t/hm<sup>2</sup>),两者相差甚远间接说明了城市圈内部碳储量分布差异巨大。值得注意的是,2020 年仅有咸宁、黄冈和黄石的地均碳密度超过城市圈整体的地均碳密度,而武汉、鄂州、仙桃、潜江和天门的地均碳密度甚至在 100 t/hm<sup>2</sup> 以下,严重拉低了城市圈地均碳密度的平均水平,不利于区域碳储量的维持和增长。

城市圈各城市碳储量的分布差异有较为明显的区别。如图 4 所示,碳储量在城市圈整体上呈现中西低、南北高的势态,且随着时间的推移,两者的差距愈发明显。以武汉、黄石和鄂州为代表的中东部碳储量的流失最为突出,主要原因在于伴随着城市社会经济的发展,高碳密度的地类如耕地和草地被逐渐侵占,取而代之的为低碳密度的建设用地。以黄冈和咸宁为代表的南北部高碳储量的区域是武汉城市圈重要的碳库所在地,其共同特点为林地、水域等高碳密度的地类较多,为城市圈南北的绿色生态屏障,开发建设活动较少,生态底色良好。但需要警惕的是,随着城市圈一体化进程的加快,黄冈和咸宁境内的建设活动也愈加频繁,区域内逐渐出现建设用地扩张侵占林地等生态用地的现象,导致这些城市的碳储量也有一定程度的下降。

表 3 各城市 2005—2020 年碳储量和地均碳密度变化情况

城市	碳储量/Tg				地均碳密度/(t·hm <sup>-2</sup> )			
	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
武汉	83.759	83.36	82.053	81.137	97.681	97.215	95.691	94.623
黄石	57.155	57.072	56.798	56.274	125.526	125.343	124.742	123.591
鄂州	15.068	15.029	14.756	14.572	94.821	94.575	92.857	91.699
孝感	99.505	99.406	98.507	99.176	111.704	111.593	110.584	111.335
黄冈	225.139	224.892	223.887	225.267	129.382	129.24	128.663	129.456
咸宁	133.277	133.084	132.426	135.543	137.155	136.956	136.279	139.487
仙桃	23.056	22.954	22.808	22.738	91.484	91.079	90.5	90.222
潜江	19.004	18.989	18.825	18.735	95.3	95.225	94.403	93.951
天门	25.022	24.957	24.764	24.62	95.581	95.333	94.596	94.045

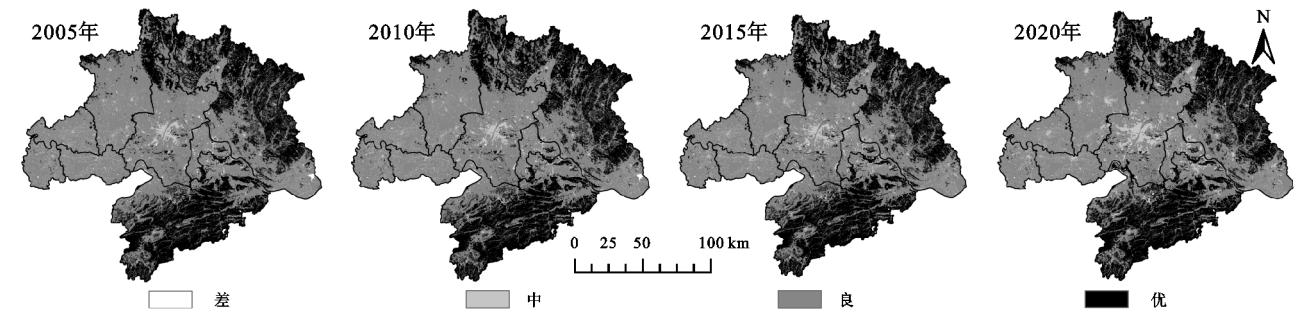


图 4 2005—2020 年碳储量分布

### 3.2 碳储量的地形梯度效应

3.2.1 武汉城市圈的地形特征 基于高程和坡度数据,本文运用公式3并结合GIS平台可得到武汉城市圈的地形位指数,结果区间介于-2.22~2.15,运用自然断点法将其划分为5个等级(图5)。由图可知,武汉城市圈的地形位整体上表现为中西部低、南北部高态势,1级占比最大(58.22%),其次是2级占比为19.43%,其余等级占比均未超过10%,表明了区域整体上地形位较低,较宜开展各项经济建设活动。

地形因素能在很大程度上影响区域土地利用格局。如表4所示,第一级别地形位指数中耕地占比最多(65.32%),而第二级别以及更高级别的地形位指数中主要地类为林地。随着地形位级别的增加,耕地、建设用地、水域和未利用地的比例越发变少,而林地和草地占比骤升。值得注意的是,2005—2020年,建设用地、水域和林地面积得到增加,而耕地、草地和未利用地面积不断缩减,表明土地利用粗放的现象依然存在。同时,观察各地类在各地形位等级的变化情况可知,地形位级别越高,变化幅度越小。这是因为地形越低,表明高程越低坡度越小,人类活动在此区域就越剧烈,对自然的改造和干扰程度就越大。但在高级别的地形位区域,高程高、坡度大,人类足迹罕至,对地类的作用力就越小。

3.2.2 基于地形梯度的碳储量时空分异 本文运用GIS技术计算2005—2020年各等级地形位指数的平均碳密度得到表5。由表5可知,随着地形位的级别不断增高,平均碳密度也相应增加,但增幅愈来愈低。2020年5等等级别的地形位的平均碳密度是1等的1.72倍,1~5等地形位的增幅分别是29.02%,23.01%,7.07%和1.39%,这说明只有当地形位等级较低时,碳储量的地形梯度效应才会明显。2005—2020年只有第一和第二级别地形位的平均碳密度处于减少势态,其他级别地形位的平均碳密度均实现增长,尤其是第三级别地形位的平均碳密度变化量最大。可能是由于第一和第二级别地形位对应的区域耕地占比较多,而耕地在整个研究期间共减少了2 443.360 5 km<sup>2</sup>,导致区域碳储量流失严重。而较高级别地形位对应的区域林地占比较多,而林地在整个研究期间共增加了1 030.729 5 km<sup>2</sup>,极大地扩充了区域碳库。

为明晰地形位与碳密度的时空分布特征,本文运用Geoda软件的空间自相关探讨两者的空间关联。需要说明的是,本文是以格网作为基本单元来对两者的空间关系进行分析的,而常见的格网尺度一般有500 m×500 m,1 km×1 km,5 km×5 km以及10 km×10 km。研究比较不同尺度下的地形位与碳密

度的空间特征,发现5 km×5 km的格网尺度结果可视化效果最优,因此本文将武汉城市圈划分为2 315个5 km×5 km的格网。由软件计算可知,2005—2020年地形位和碳密度的莫兰指数分别为0.485 4,0.485 2,0.480 6,0.481 4,且均在0.01水平下显著相关,表明区域地形位与碳密度呈现显著空间正相关关系,随着地形位等级的增加,碳密度也愈发变大,区域碳储量也越集聚。而且需要指出,莫兰指数呈现先增大后减少趋势,与区域碳储量的变化保持一致。究其原因在于,2005—2015年区域碳储量因耕地和林地等高碳密度地类的大量缩减和建设用地等低碳密度地类的快速扩张而流失,但2015—2020年期间因林地面积不断增加,区域碳库得到补充。而林地大多集中于高级别地形位区域,促使区域整体上莫兰指数的增加。观察地形位与碳密度的空间分布可知(图6),低低聚类(低地形位低碳储量)的栅格数最多,主要分布在城市圈的中西部,如武汉市中部、孝感南部、仙桃、潜江和天门全境,这些区域地势平坦且经济发展较好,人类活动频繁导致碳储量较少。其次是高高聚类(高地形位高碳储量)的栅格,其主要集中于城市圈南北部,如黄冈市北部、咸宁市中南部、孝感北部和黄石部分地区,这些区域大多为山地且经济发展较为落后,自然环境良好,林草覆盖率高。低高聚类(低地形位高碳储量)栅格占比较少,主要镶嵌于高高聚类之中,表明低等级地形位的区域并不意味着碳储量就少,只要当地居民注重经济发展过程中的环境问题,坚持两者并重,定能走向高质量发展之路。高低聚类(高地形位低碳储量)占比最少,零星分布于武汉市、黄石市和黄冈市境内,其对应地类多为区域山地的未利用地,碳密度较小。分析2005—2020年地形位与碳密度空间自相关的变化可知,高高聚类栅格数呈现先减少后增加态势,增加的栅格主要分布在黄冈和咸宁境内,可能的原因在于该地区退耕还林工程的实施,导致林地面积增加,从而扩充了区域碳储量。低低聚类的栅格数呈现持续缩减趋势,减少的栅格集中于武汉、黄石和鄂州境内,这些区域发展迅猛,建设用地的扩张不可避免侵占部分高碳密度地类,导致区域碳储量流失。

### 3.3 碳储量的脆弱性评估

3.3.1 碳储量对土地利用变化的响应 各地类的碳密度不同,相互转换时必然会造成区域碳储量的变动。其中,林地(170.18 t/hm<sup>2</sup>)和草地(113.01 t/hm<sup>2</sup>)是区域高密度最高的地类,耕地(105.01 t/hm<sup>2</sup>)和水域(69.6 t/hm<sup>2</sup>)次之,但由于两者面积较大,是区域的重要碳库。而建设用地(44.62 t/hm<sup>2</sup>)以及未利用地(30.61 t/hm<sup>2</sup>)则为低碳密度地类。本文制作2005—

2020 年的土地利用转移矩阵,并将其中 4 种主要地类转换情况在 GIS 中可视化表现出来,同时将 2005—2020 年的碳储量变化情况对比分析。由图 7 可知,耕地转向建设用地是造成区域碳储量流失的主要原因,研究期间共转移面积为 1 169.220 6 km<sup>2</sup>,导致碳流失高达 7.068 Tg,主要分布在武汉市中部、孝感市东部以及黄冈市、鄂州市和黄石市三市接壤处,这些区域都紧靠在武汉市周边,在研究期间承接武汉市的产业转移和经济发展的外溢效应,致使建设用地扩张侵占耕地的现象较为频繁。同时与 2005—2020 年区域碳储量变化图作比较,发现这些区域也是碳储量减少最急剧和范围最大的地方。林地转为建设用地(150.133 5 km<sup>2</sup>)和耕地转向水域(158.221 8 km<sup>2</sup>)也为城市圈碳储量损失的重要原因,但值得注意的是,虽然该两种转换面积基本一致,但造成的碳储量流失却有较大区别。其中林地转为建设用地共造成 1.885 Tg 的碳流失,主要分布在武汉市、黄冈市和咸宁市的部分区域,虽然林地减少面积较少,但因林地为高碳密度地类,即使面积少量损失,也会对区域碳库造成较大负面影响。而耕地转向水域共造成了 0.56 Tg 的碳流失,集中分布在天门与孝感的接壤处,可能的原因在于区域将一些撂荒或者产量不高的

耕地转变为水库或者湖泊,提高其利用率。但耕地向林地的转化是区域碳储量增加的主要原因,转化面积达 1 169.220 6 km<sup>2</sup>,扩充区域碳库 7.62 Tg,主要分布在黄冈、孝感和咸宁北部,这些地区均海拔较高,不适宜耕作,退耕还林工程在持续推进,有利于维护当地的生态环境。同时比较区域碳储量变化可知,碳储量的增加部分同样集中于此。由此可见,碳储量的变化与地类转换是紧密相关。

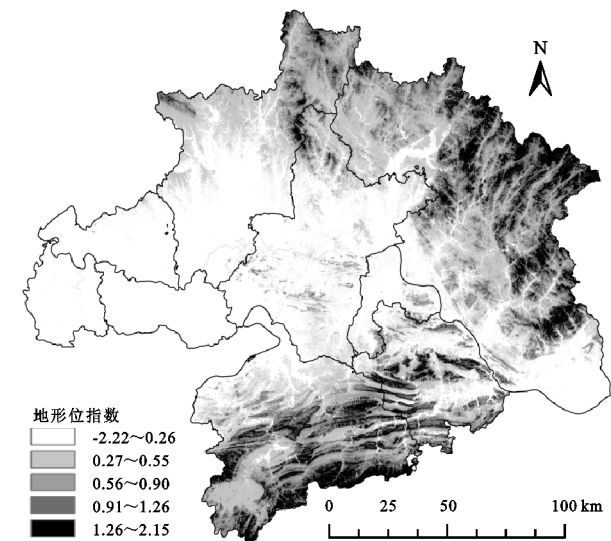


图 5 地形位指数分布

表 4 不同地形位指数的各地类结构情况

地形位指数	土地利用结构/%					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
1	65.32/−2.84	17.28/0.34	1.01/−0.02	11.23/0.41	4.72/2.23	0.44/−0.12
2	31.11/−1.67	62.33/0.57	2.87/−0.02	2.16/0.13	1.49/1.06	0.04/−0.07
3	17.03/−0.96	77.52/0.59	3.21/0.02	0.81/0.08	1.42/0.27	0.01/0.00
4	11.29/−0.81	83.07/0.65	5.21/−0.03	0.28/0.07	0.14/0.12	0.01/0.00
5	6.67/−0.52	85.85/0.58	7.32/−0.13	0.09/0.04	0.06/0.03	0.01/0.00

注:表中数值分别代表 2020 年/2005—2020 年变化值。

表 5 各等级地形位的平均碳密度情况

地形位等级	碳密度/(t·hm <sup>−2</sup> )				2005—2020 年变化值/(t·hm <sup>−2</sup> )
	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	
1	93.994	93.705	92.475	92.594	−1.400
2	119.585	119.318	119.585	119.463	−0.122
3	145.323	145.206	144.969	146.946	1.623
4	156.202	156.162	156.083	157.333	1.131
5	159.020	159.015	158.870	159.515	0.495

3.3.2 碳储量的多尺度脆弱性分析 基于脆弱性的评估方法与生态系统服务对土地利用变化的脆弱性响应机理,本文评估区域 2005—2020 年多尺度下的碳储量对土地利用变化的脆弱性。由表 6 可知,从城市圈整体上来看,其土地利用强度处于中等开发水平,研究期间强度指数表现为先增加后减少态势。其原因主要在于 2005—2015 年区域强度级别最高的建

设用地迅猛扩张,10 a 共增加了 897.932 7 km<sup>2</sup>,将城市圈土地利用强度提高了 1.737 个点。而 2015—2020 年建设用地虽仍在扩张(544.972 5 km<sup>2</sup>),但强度级别较高的耕地却急剧减少(1 618.946 1 km<sup>2</sup>),从而拉低了区域整体的土地利用强度。同时,区域碳储量呈现先减少后增加趋势,2005—2015 年区域整体上表现为碳源,而 2015—2020 年表现为碳汇,尤其是 2010—2015 年区域碳储量流失最为严重。就 PI 而言,3 个时间段的 PI 指数均为负,表明区域土地利用会对碳储量造成负面的潜在影响,碳储量服务的脆弱性会进一步恶化。

2005—2010 年 PI 指数为−4.875,表明该时间段因区域土地的不合理利用造成了碳储量服务的退化,不仅表现为碳储量总量上的减少,而且会带来持续的潜在负面影响。2010—2015 年 PI 指数为−3.317,虽



潜在影响有所缓解,但仍会对经济发展产生掣肘,这种影响在2015—2020年进一步恶化,值得引起重视。从城市圈各个城市来看(图8),除天门在2010—2015年和2015—2020年PI指数为正之外,其余城市的PI指数均为负,且变化趋势和城市圈整体一致。尤其是黄石和黄冈两地PI指数绝对值较大,它们在研究期间发展较为迅猛,跟随武汉市步入经济快车道,

但发展过程中未注重对环境的保护,导致对区域内碳储量的负向潜在影响不断恶化。而天门市在两个时间段内PI指数均为正,观察其土地利用可知,期间区域耕地保持平稳状态,而水域面积大幅增长,建设用地扩张也较为缓慢,较好地平衡了区域发展与环境的平衡,城市在经济建设过程中的同时增强了碳储量服务的脆弱性。

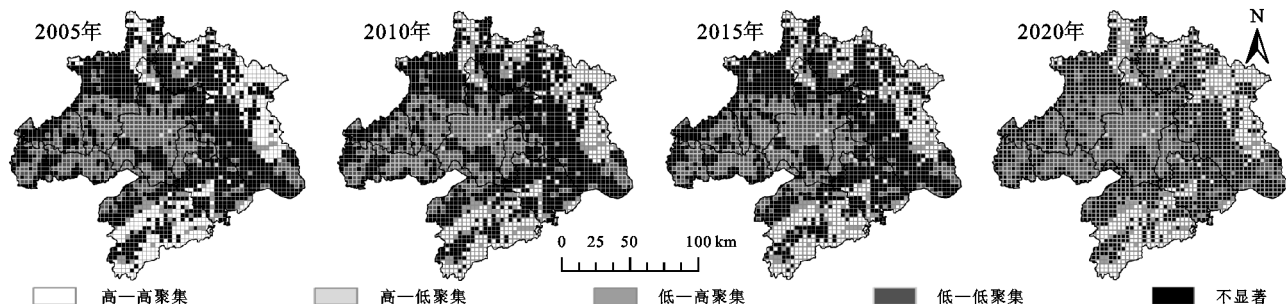


图6 2005—2020年碳密度与地形位指数的空间自相关分析

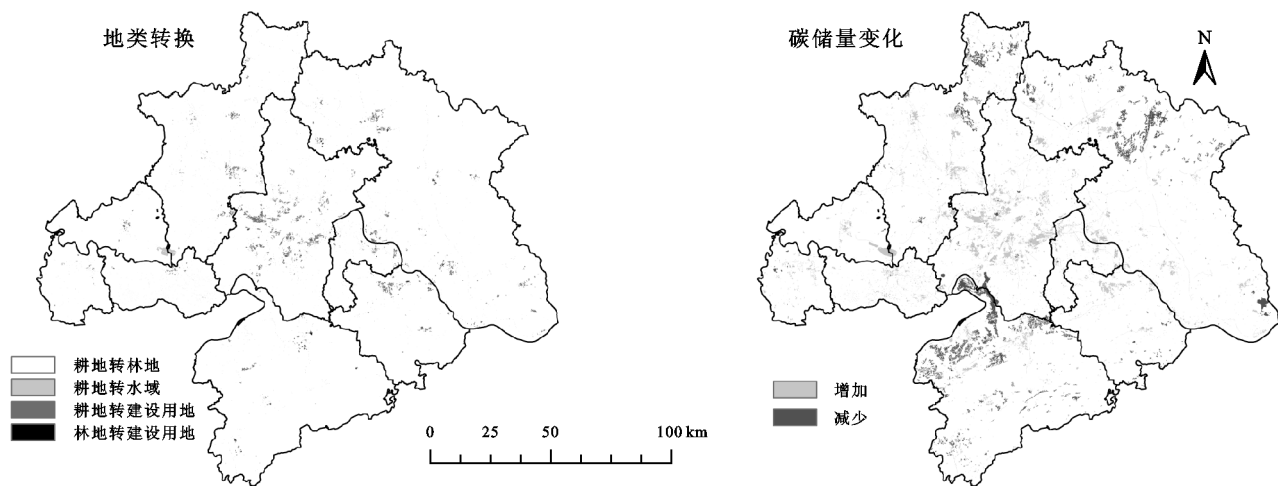


图7 2005—2020年地类转换和碳储量变化

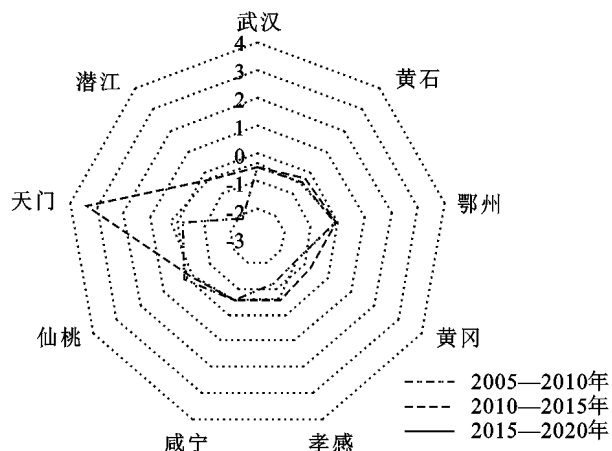
表6 土地利用对碳储量服务的潜在影响

年份	碳储量/ Tg	强度/ L	碳储量 变化/ $\Delta Tg$	强度变化/ $\Delta L$	PI/ ( $\Delta Tg/\Delta L$ )
2005	679.989	261.829	—	—	—
2010	678.746	262.084	-1.243	0.255	-4.875
2015	673.830	263.566	-4.916	1.482	-3.317
2020	678.062	262.668	4.232	-0.898	-4.713

## 4 结论

(1) 武汉城市圈2005年、2010年、2015年、2020年碳储量分别为679.989 Tg, 678.747 Tg, 673.832 Tg和678.063 Tg, 15年间总碳储量呈先减少后增加势态。各城市碳储量的变化情况与城市圈整体趋势大致相同,但城市间内部差异较大。其中,黄冈、咸宁和孝感是城市圈中碳储量最多的3个城市,2020年三者碳储量之和约占区域的67.84%,是区域的重要碳库。碳储量在空间分布上呈现中西低、南北高的势态,且随着时间

的推移,两者的差距愈发明显。以武汉、黄石和鄂州为代表的中东部碳储量的流失最为突出。



注:图中数字代表PI指数。

图8 各城市土地利用对碳储量服务的潜在影响

(2) 武汉城市圈的地形位整体上表现为中西部低、南北部高态势,1级占比最大(58.22%),其次是2



级占比为19.43%,其余等级占比均未超过10%。随着地形位的级别不断增高,平均碳密度也相应增加,但增幅愈来愈低。由空间自相关分析可知,区域地形位与碳密度呈现显著空间正相关关系。低低聚类的栅格数最多,主要分布在城市圈的中西部,其次是高高聚类的栅格,其主要集中于城市圈南北部。

(3) 耕地转向建设用地是造成区域碳储量流失的主要原因,研究期间共转移面积为1 169.220 6 km<sup>2</sup>,导致碳流失高达7.068 Tg,而耕地向林地的转化是区域碳储量增加的主要原因,转化面积达1 169.220 6 km<sup>2</sup>,扩充区域碳库7.62 Tg。就碳储量的脆弱性评估而言,从城市圈整体上来看,2005—2020年的PI指数均为负,表明区域土地利用会对碳储量造成负面的潜在影响,碳储量服务的脆弱性会进一步恶化。从城市圈各个城市而言,除天门在2010—2015年和2015—2020年PI指数为正之外,其余城市的PI指数均为负,且变化趋势和城市圈整体一致。基于碳储量脆弱性的评估结果,并结合我国的“双碳”目标的重要战略,本文建议未来城市圈在发展过程中,应合理调控土地利用供需,加大对区域未利用地的利用率,严守区域永久基本农田红线和生态保护红线,缓解区域最大碳库耕地的过快流失,保持高密度碳库林地和草地的不断增长,减少低密度碳库建设用地的无序扩张,降低土地利用变化对碳储量服务的干扰,将区域PI指数由负转正,走可持续发展之路。

#### 参考文献:

- [1] Guo X, Fang C. Integrated land use change related carbon source/sink examination in Jiangsu Province [J]. *Land*, 2021,10(12):1310-1328.
- [2] Gu S, Li S, Santos I R. Anthropogenic land use substantially increases riverine CO<sub>2</sub> emissions [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022,118(8):158-170.
- [3] Sha Z, Bai Y, Li R, et al. The global carbon sink potential of terrestrial vegetation can be increased substantially by optimal land management [J]. *Communications Earth & Environment*, 2022,3(1):1-10.
- [4] Gao R, Chuai X, Ge J, et al. An integrated tele-coupling analysis for requisition-compensation balance and its influence on carbon storage in China [J]. *Land Use Policy*, 2022,116(5):106-117.
- [5] 张平平,李艳红,殷浩然,等.中国南北过渡带生态系统碳储量时空变化及动态模拟[J].*自然资源学报*,2022,37(5):1183-1197.
- [6] 李姣,汪杰,李朗,等.洞庭湖生态经济区土地利用变化对碳储量的影响[J].*生态学杂志*,2022,41(6):1156-1165.
- [7] 张凯琪,陈建军,侯建坤,等.耦合 InVEST 与 GeoSOS-FLUS 模型的桂林市碳储量可持续发展研究[J].*中国环境科学*,2022,42(6):2799-2809.
- [8] 王天福,龚直文,邓元杰.基于土地利用变化的陕西省植被碳汇提质增效优先区识别[J].*自然资源学报*,2022,37(5):1214-1232.
- [9] 张立,金晶泽,姜侠,等.1986—2019年黑龙江省松嫩平原表层土壤有机碳变化及固碳潜力估算[J].*现代地质*,2021,35(4):914-922.
- [10] 陈美景,王庆日,白中科,等.碳中和愿景下“三生空间”转型及其碳储量效应:以贵州省为例[J].*中国土地科学*,2021,35(11):101-111.
- [11] Rijal S, Rimal B, Acharya R P, et al. Land use/land cover change and ecosystem services in the Bagmati River Basin, Nepal [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021,193(10):1-17.
- [12] 王晓萌,潘佩佩,王晓旭,等.基于土地利用的河北省生态系统服务权衡/协同关系研究[J].*地理与地理信息科学*,2021,37(1):80-88.
- [13] 刘国栋,戴慧敏,杨泽,等.三江平原土壤碳库时空变化和影响因素研究[J].*现代地质*,2021,35(2):443-454.
- [14] Li Z, Cheng X, Han H. Future impacts of land use change on ecosystem services under different scenarios in the ecological conservation area, Beijing, China [J]. *Forests*, 2020,11(5):58-70.
- [15] 刘洋,张军,周冬梅,等.基于 InVEST 模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究[J].*生态学报*,2021,41(10):4052-4065.
- [16] 李瑾璞,于秀波,夏少霞,等.白洋淀湿地区土壤有机碳密度及储量的空间分布特征[J].*生态学报*,2020,40(24):8928-8935.
- [17] 隋玉正,孙大鹏,李淑娟,等.碳储存变化背景下东营市海岸带生态系统保护修复[J].*生态学报*,2021,41(20):8112-8123.
- [18] Ahmadi Mirghaed F, Souri B. Effect of landscape fragmentation on soil quality and ecosystem services in land use and landform types [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2022,81(12):1-13.
- [19] 李妙宇,上官周平,邓蕾.黄土高原地区生态系统碳储量空间分布及其影响因素[J].*生态学报*,2021,41(17):6786-6799.
- [20] 徐彩仙,巩杰,李焱,等.基于地形梯度的甘肃白龙江流域典型生态系统服务分布特征[J].*生态学报*,2020,40(13):4291-4301.
- [21] Xu X, Wang L, Sun M, et al. Climate change vulnerability assessment for smallholder farmers in China: An extended framework [J]. *Journal of Environmental*

- Management, 2020, 276(12):111-123.
- [22] Sekhri S, Kumar P, Fürst C, et al. Mountain specific multi-hazard risk management framework(MSMRMF): Assessment and mitigation of multi-hazard and climate change risk in the Indian Himalayan Region[J]. Ecological Indicators, 2020, 118(12):106700-106713.
- [23] Liu L, Liang Y, Hashimoto S. Integrated assessment of land-use/coverage changes and their impacts on ecosystem services in Gansu Province, northwest China: Implications for sustainable development goals [J]. Sustainability Science, 2020, 15(1):297-314.
- [24] 闫啸,李录堂,李晗.宅基地退出降低了农户的贫困脆弱性吗:来自安徽金寨的证据[J].中国土地科学, 2022, 36(4):38-48.
- [25] 牛志君,周亚鹏,王树涛,等.县域土地利用变化对碳储量的影响与评价:以黑龙江流域巨鹿县为例[J].水土保持研究, 2018, 25(3):292-297, 304.
- [26] 向书江,张骞,王丹,等.近20年重庆市主城区碳储量对土地利用/覆被变化的响应及脆弱性分析[J].自然资源学报, 2022, 37(5):1198-1213.
- [27] 李若玮,叶冲冲,王毅,等.基于 InVEST 模型的青藏高原碳储量估算及其驱动力分析[J].草地学报, 2021, 29(S1):43-51.
- [28] 张斌,李璐,夏秋月,等.“三线”约束下土地利用变化及其对碳储量的影响:以武汉城市圈为例[J].生态学报, 2022, 42(6):2265-2280.
- [29] 张玉,张道军.地形位指数模型改进及其在植被覆盖评价中的应用[J].地理学报, 2022, 77(11):2757-2772.
- [30] 危小建,赵莉,程朋根,等.中国土地利用与生态服务价值空间动态研究:以地级及以上城市为例[J].水土保持研究, 2022, 29(4):370-376.
- [31] Li L, Tang H, Lei J, et al. Spatial autocorrelation in land use type and ecosystem service value in Hainan Tropical Rain Forest National Park[J]. Ecological Indicators, 2022, 137(4):108-120.
- [32] 陈万旭,曾杰.中国土地利用程度与生态系统服务强度脱钩分析[J].自然资源学报, 2021, 36(11):2853-2864.
- [33] Schröter D, Cramer W, Leemans R, et al. Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe[J]. Science, 2005, 310(5752):1333-1337.
- [34] Metzger M J, Rounsevell M D A, Acosta-Michlik L, et al. The vulnerability of ecosystem services to land use change[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 114(1):69-85.

~~~~~

(上接第434页)

- [19] 李伯华,刘沛林,窦银娣.转型期欠发达地区乡村人居环境演变特征及微观机制:以湖北省红安县二程镇为例[J].人文地理, 2012, 27(6):56-61.
- [20] 曹萍,盛业旭,任建兰.中国乡村人居环境脆弱性演化及影响因素[J].地域研究与开发, 2021, 40(5):7-12.
- [21] 唐宁,王成.重庆县域乡村人居环境综合评价及其空间分异[J].水土保持研究, 2018, 25(2):315-321.
- [22] 蒲金芳,王亚楠,刘沙沙,等.河北省县域乡村人居环境质量评价及其影响因素研究[J].中国农业资源与区划, 2022, 43(12):248-259.
- [23] 李裕瑞,张轩畅,陈秧分,等.人居环境质量对乡村发展的影响:基于江苏省村庄抽样调查截面数据的分析[J].中国人口·资源与环境, 2020, 30(8):158-167.
- [24] 陈文胜.湖南乡村振兴报告[M].北京:社会科学文献出版社, 2021.5-11.
- [25] 彭焕智,周国华,崔树强,等.湘江流域土地利用多功能性评价及障碍因子识别[J].水土保持研究, 2022, 29(4):308-315.
- [26] 金贵,邓祥征,赵晓东,等.2005—2014年长江经济带城市土地利用效率时空格局特征[J].地理学报, 2018, 73(7):1242-1252.
- [27] 宾津佑,唐小兵,陈士银.广东省县域乡村人居环境质量评价及其影响因素[J].生态经济, 2021, 37(12):203-209, 223.
- [28] 吴良镛.人居环境科学导论[M].北京:中国建筑工业出版社, 2001.12-15.
- [29] 王检萍,余敦,孙聪康,等.国土空间规划背景下村域“三生”空间划定与实证研究[J].中国农业资源与区划, 2021, 42(11):265-275.
- [30] 许亿欣,王晓霞,周景博,等.农村人居环境治理满意度及影响因素分析:基于2019年的典型调查[J].干旱区资源与环境, 2022, 36(5):17-24.